

## CALCINAÇÃO

**Antônio Rodrigues de Campos**

Eng. Metalúrgico pela UFOP, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

**Adão Benvindo da Luz**

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

**Flavia de Freitas Bastos**

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre em  
Engenharia Mineral pela UFPE  
Mineração Royal Gipso Ltda e  
Professora do IFPI (Campus Paulistana)

**Igor Nogueira**

Eng. Químico pela Universidade Católica de Pernambuco  
Diretor da Nogueira Soluções em Engenharia



## INTRODUÇÃO

---

Calcinação é o tratamento térmico a que é submetido, notadamente carbonatos e hidratos, para remoção de CO<sub>2</sub>, água e outros gases “ligados fortemente, quimicamente” a essas substâncias (ROSENQUIST, 1983). A calcinação é um processo endotérmico, que é usado principalmente na produção de óxidos, segundo as reações químicas das Equações [1], [2] e [3].



Como visto na Equação [1], a cal (CaO) é um dos produtos que pode ser obtido pela calcinação do calcário (rocha contendo mais de 30% de CaCO<sub>3</sub>), liberando CO<sub>2</sub> (gás carbônico), sendo o dolomito também uma rocha bastante utilizada na produção da cal.

A cal é um dos produtos mais antigos obtidos pelo homem. Existem registros do uso desse produto que datam de mais de 2000 anos. Um exemplo é a muralha da China, onde se pode encontrar, em alguns trechos da obra, uma mistura bem compactada de terra argilosa e cal (CARPIO et al., 2013). Os gregos e romanos usaram tufo vulcânico misturado à cal na forma de um cimento, e muitas construções com este material ainda existem. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin patenteou um cimento artificial, denominado cimento Portland, obtido pela calcinação de calcário argiloso (BOGUE, 1955; BOGUE e GILKEY, 1964).

Do ponto de vista prático, o conceito de calcinação tem sido empregado de maneira ampla, e descreve o tratamento térmico aplicado a quaisquer substâncias sólidas, visando aos seguintes objetivos:

- remoção de uma fase volátil, quimicamente ligada a um determinado sólido;
- decomposição térmica;
- produção de um óxido;
- mudança de uma estrutura, em substâncias cristalinas.

As temperaturas de calcinação são variáveis, por exemplo, o MgCO<sub>3</sub> se decompõe aproximadamente à temperatura de 400°C, enquanto que para decompor o CaCO<sub>3</sub> deve-se atingir temperaturas na faixa de 850 e 900°C (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

As propriedades de estrutura e morfologia do produto de calcinação são influenciadas pela temperatura de calcinação e pelo tempo de residência do processo. Essas são mais intensas, na medida em que forem maiores as temperaturas de

calcinação e o tempo de residência do processo, contribuindo para diminuir a reatividade de alguns produtos calcinados (HECK, 2017).

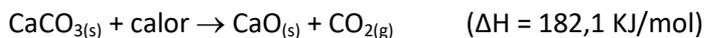
A calcinação tem uma importância industrial muito significativa, na produção da cal, de gesso, na fabricação de cimento, na produção de alumina, dentre outras. A calcinação é realizada em diferentes tipos de reatores, tais como: forno vertical (forno de cuba), intermitente ou contínuo, forno rotativo e forno de leito fluidizado (TRAJANO, 1969).

Uma característica do processo de calcinação é o uso de uma fase gasosa para transferir o calor necessário e, simultaneamente, arrastar, o mais rápido possível, os produtos gasosos gerados na decomposição, para um melhor desempenho do processo, sendo muito importante o controle da pressão do  $\text{CO}_2$  (CUNHA et al., 1949).

## ASPECTOS TERMODINÂMICOS DA CALCINAÇÃO

---

A calcinação é um processo endotérmico e tem um modelo reacional descrito na Equação [1].



Nesta equação, tem-se o calor necessário para decompor 1 mol de  $\text{CaCO}_3$ , tendo como produtos, 1 mol de  $\text{CaO}$  e 1 mol de  $\text{CO}_2$ . Por ser uma reação endotérmica, esta é favorecida pelas altas temperaturas. Para que a reação ocorra, a pressão parcial do  $\text{CO}_2$  no gás sobre a superfície do calcário deve ser menor do que a pressão de decomposição do próprio  $\text{CaCO}_3$  (SOARES, 2007).

A granulometria do calcário (ou quando o leito está na forma empacotada) tem influência significativa na sua taxa de decomposição durante a calcinação, que pode ser inibida devido às zonas de altas concentrações de  $\text{CO}_2$  preso nos interstícios das partículas da rocha ou nos interstícios do leito (SOARES, 2007). A forma compactada pode ocorrer quando há excesso de material fino na alimentação dos fornos de calcinação. Isso torna mais lento o processo de decomposição, podendo até interromper o fluxo do  $\text{CO}_2$  já liberado, provocando paradas indesejáveis à operação (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

A entalpia da calcinação do carbonato de cálcio, Equação [1], é quase quatro vezes maior do que aquela da evaporação da água; além disto, a energia (sob forma de calor) deve ser fornecida em temperaturas elevadas – fato que onera ainda mais o processo de calcinação, pois requer fontes de calor de alta temperatura. Porém, sugere-se que o aquecimento da carga seja gradativo, bem como o uso adequado da granulometria da alimentação para evitar a compactação da carga. A granulometria adequada é inclusive importante, dependendo do tipo de forno a ser utilizado. Para faixas granulométricas mais grossas são utilizados normalmente os fornos verticais,

enquanto que para os fornos rotativos são indicadas faixas granulometrias não muito grossas, mais baixas que as utilizadas nos fornos verticais (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

Algumas substâncias, ao perderem água de cristalização, sofrem hidrólise, impossibilitando a sua calcinação; por exemplo, a obtenção de  $MgCl_2$  anidro a partir do  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  não é possível, pois no aquecimento este perde parte da água, produzindo  $MgCl_2 \cdot 3/2H_2O$ . Esta substância, ao ser aquecida, se hidrolisa, produzindo  $MgO$ , mostrado pelas Equações [4] e [5] (HECK, 2017).



## CINÉTICA DA CALCINAÇÃO

---

Segundo Soares (2007), a cinética de calcinação é considerada complexa, face aos diversos fatores, tais como:

- a concentração do  $CO_2$ , que poderá inibir a reação;
- a distribuição granulométrica das partículas, que poderá afetar a transferência de calor, bem como a transferência de massa;
- a presença de impurezas na matéria prima mineral. Neste contexto, estudos verificaram que a presença de impurezas afeta a decomposição térmica do calcário.

A taxa de calcinação dos carbonatos se torna elevada quando se atinge a temperatura onde a pressão parcial de equilíbrio do  $CO_2$  ou da água torna-se igual à pressão total do reator (fenômeno semelhante ao da ebulição); esta temperatura é denominada de temperatura de decomposição ou de calcinação, e é muito importante na prática industrial.

É importante lembrar que os gases que transportam calor contêm  $CO_2$  ou água; esse fato prejudicial se assemelha, em última análise, ao uso de gases úmidos no processo de secagem. Os gases provenientes da combustão do carvão, por exemplo, podem conter grande quantidade de  $CO_2$ .

A taxa de conversão na calcinação dos carbonatos parece ser controlada pelo fornecimento de calor para a decomposição, ao menos para partículas maiores do que 40 mm. Assim, a calcinação dos carbonatos é governada pelas mesmas leis que se aplicam às reações controladas pela difusão: (i) o tempo de decomposição é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula; e (ii) a taxa de conversão é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula. Não se deve esquecer, no entanto, que outros fatores como, por exemplo, a existência de porosidade aberta na partícula, trincas etc., podem ter papéis muito importantes no processo de calcinação (HECK, 2017).

## PROCESSOS DE CALCINAÇÃO

---

### Calcinação do Calcário para Produção de Cal (CaO)

A tecnologia de produção da cal é muito simples. Tão simples que pode se pensar que está ao alcance de qualquer pessoa fabricar a cal em fornos comuns. Apesar de simples, no entanto, exige que se observem determinadas condições mínimas, mesmo com a utilização de fornos comuns (CUNHA et al., 1949).

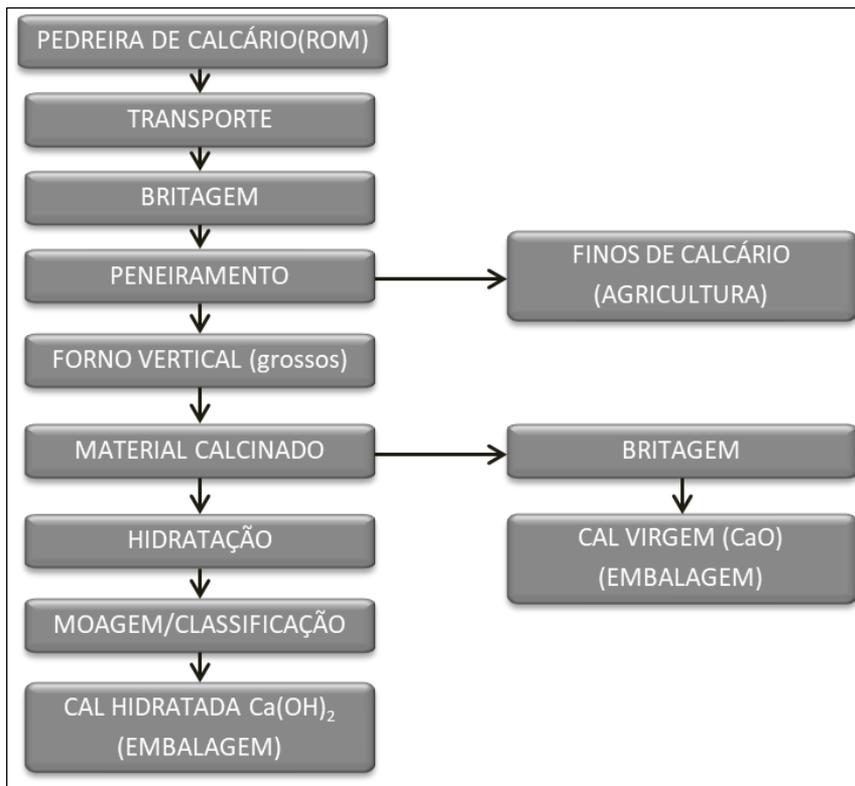
A cal ou óxido de cal (CaO) é um produto derivado, principalmente, da calcinação do calcário ou dolomito, hidratados ou não, sendo também chamada de cal ordinária ou cal virgem. Esta última denominação é a mais consagrada na literatura brasileira e pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (GUIMARÃES, 1958).

Na produção da cal virgem, como se sabe, há o desprendimento do gás CO<sub>2</sub> (gás carbônico), segundo a Equação [1]. É imprescindível que o desprendimento de CO<sub>2</sub> seja feito de forma correta, sendo uma das condições fundamentais para o bom êxito da reação de decomposição, pois esta é reversível, dependendo da quantidade de CO<sub>2</sub> presente. Liberado o gás carbônico, este deve ser arrastado rapidamente para fora do forno, sendo uma das chaves do processo (CUNHA et al., 1949).

Outro ponto a ser observado é que, durante o aquecimento, a alta temperatura, vai se processando um novo arranjo estrutural da rocha calcária. Essa modificação tende, com a elevação da temperatura ou com o prolongamento do aquecimento, a tornar mais densa a estrutura da rocha, pela eliminação dos vazios da estrutura anterior. A permanência desses vazios, como verdadeiros canais de penetração da água, vai facilitar a hidratação da cal virgem na ocasião da hidratação. Deve-se, portanto, evitar o superaquecimento, que se traduz em sub-hidratação (CUNHA et al., 1949).

Essas duas noções já expostas, indicam claramente que o técnico responsável pela usina de calcinação deve ter razoáveis conhecimentos teóricos e práticos, sobre a melhor forma de aquecimento e funcionamento do forno. Esses conhecimentos visam, no mínimo, um bom aproveitamento do combustível, uma boa tiragem (boa fornada) e, também, um razoável controle de temperatura de operação do forno.

A produção da cal virgem ou cal hidratada consiste, basicamente, da lavra do calcário calcítico ou dolomítico (*run of mine*), nas chamadas pedreiras de calcário; transporte; britagem; peneiramento, para a retirada da fração fina; e a calcinação do material grosso (Figura 1).



**Figura 1.** Fluxograma de produção de cal.

Fonte: Adaptado de MEDEIROS, 2017

A fração fina obtida no peneiramento do calcário britado é utilizada no mercado para aplicação na agricultura.

O material calcinado que sai dos fornos de calcinação pode seguir dois caminhos:

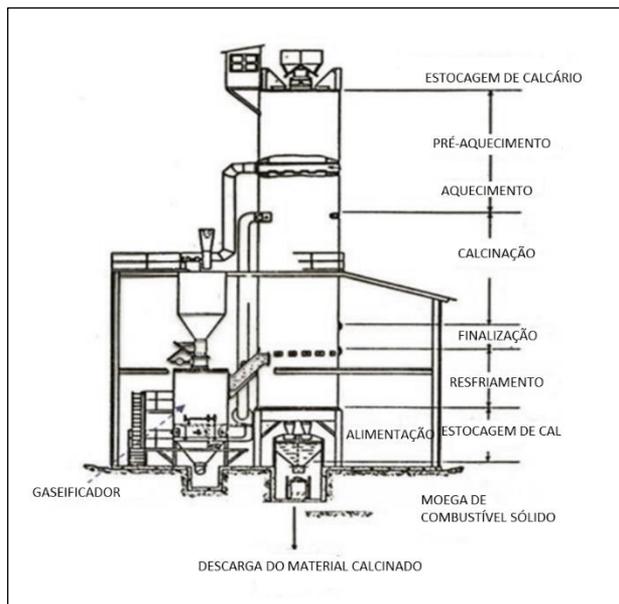
- ser cominuído, para a produção da cal virgem;
- ser submetido às operações de hidratação e moagem/classificação, para a produção da cal hidratada ou leite de cal [Ca(OH)<sub>2</sub>], para o mercado. A reação de hidratação da cal, para formar a cal hidratada, é extremamete exotérmica.

As tecnologias usadas para a calcinação variam, de rudimentares, para o caso dos pequenos produtores, a tecnologias avançadas, no caso de grandes produtores que operam com tecnologias avançadas, desde o planejamento de lavra, uso de fornos de alta produtividade e eficiência térmica, a controle de emissão de efluentes, utilizando equipe técnica preparada e laboratório apropriado, para controle de processo e produtos (JOHN et al., 2014).

A indústria da cal iniciou suas atividades no Brasil, em 1549, quando as instalações das primeiras “caieiras” para a fabricação de cal virgem, a partir de conchas marinhas, para as argamassas de revestimento e pinturas dos casarios da cidade de Salvador (Bahia), implantada pelo fidalgo português, Thomé de Souza, capital da terra recém-descoberta. A colonização portuguesa levou para o interior do território brasileiro, a arte de fabricar cal, principalmente para proteger das intensas chuvas tropicais, as paredes de barro, armado ou socado, de suas moradias e fortificações (GUIMARÃES, 1990).

Em tempos idos, a fabricação da cal era feita em fornos rudimentares, e de forma intermitente. Iniciou-se pela queima da pedra calcária, arrumada em pequenos montes. Depois, a calcinação da pedra calcária passou a ser realizada em buracos feitos no chão, onde se colocava lenha, a pedra calcária e ateava-se fogo. Foram utilizados também fornos de “barranco”, onde a lenha era queimada desordenadamente. Estes fornos são de pequena produção, com grande perda de calor no processo. Depois, estes foram dando lugares aos fornos verticais contínuos que, por sua vez, foram cedendo lugares aos fornos rotativos.

Os principais tipos de fornos usados na produção de cal são: fornos verticais, forno rotativo e forno de leito fluidizado, sendo os mais usados os fornos verticais (contínuos ou intermitentes) e os fornos rotativos. Há fornos descontínuos de barranco ou fornos contínuos de barranco. Os fornos de barranco são construídos, aproveitando a declividade do terreno, para facilitar, principalmente, as operações nas suas diferentes etapas de produção da cal e, possivelmente para diminuir os custos de construção dos fornos. Um forno contínuo vertical pode ser visto na Figura 2 (PAIVA et al., 2007). Existem outros tipos de fornos verticais, como forno vertical metálico de cuba simples e forno vertical de cubas múltiplas e fluxos paralelos. A Figura 3 mostra um forno longo rotativo, com pré-aquecedor; há outros fornos como de fluxo paralelo regenerativo, forno de eixo anular etc. Os combustíveis usados nos fornos de calcinação são: biomassa (lenha), gás, óleo combustível (BPF), coque metalúrgico e carvão. No caso do uso de biomassa (lenha) é aconselhável evitar a alta umidade (CARPIO et al., 2013; JOHN et al., 2014).



**Figura 2.** Forno de calcinação de calcário para produção de cal.  
Fonte: PAIVA et al., 2007



**Figura 3.** Forno rotativo de calcinação para produção de cal.

Os fornos intermitentes representam a fase antiquada e rudimentar da indústria de cal, e foram sendo substituídos pelos contínuos, que por sua vez, vão cedendo lugar aos fornos rotativos.

As desvantagens dos fornos intermitentes ou descontínuos são tão óbvias que somente se poderia admitir a sua construção em lugares onde a procura da cal for muito pequena ou muito irregular, não compensando, economicamente, a instalação de fornos contínuos, de maior investimento. Nos fornos descontínuos, o consumo de combustível é muito superior ao dos fornos contínuos.

Carpio et al. (2013) realizaram um trabalho de pesquisa, objetivando avaliar as diversas etapas do processo industrial de produção de cal, desde os métodos de lavra empregados na exploração dos diferentes tipos de calcário (calcítico e dolomítico), seguido dos processos de calcinação, bem como os problemas ambientais causados nestes processos. Segundo, ainda, os mesmos autores, as tecnologias empregadas, principalmente pelas pequenas empresas de países em desenvolvimento, são ultrapassadas e contribuem para um elevado consumo de combustível, baixa eficiência energética e grande impacto ambiental resultante, principalmente, da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Para a melhoria de eficiência na produção, as investigações têm-se sido concentradas no desenvolvimento dos equipamentos de calcinação e na escolha e eficiência térmica dos combustíveis utilizados no processo (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008). Dentro das limitações da empresa e da tecnologia utilizada, sabe-se que fornos mais altos aproveitam melhor o calor fornecido ao processo, evitando a saída rápida de gases ainda quentes.

No ano de 2014, o Brasil produziu 8,1 milhões de toneladas de cal, ocupando o 5º lugar na produção mundial. A China continua em primeiro lugar, com 69,3% da produção mundial (GALO e GAMA JÚNIOR, 2015).

#### *Usos da Cal*

Os principais usos da cal são: indústria siderúrgica, indústria de não ferrosos, construção civil, controle ambiental, indústria química, papel e celulose, indústria alimentícia, indústria farmacêutica, agricultura, estabilização de solos, indústria açucareira, tratamento de águas potáveis e industriais, indústria de carbureto de cálcio, indústria de tintas, processamento mineral, dentre outras (GALO e GAMA JÚNIOR, 2015; JOHN et al., 2014; GUIMARÃES, 1990).

A cal é produzida na forma de cal virgem e cal hidratada ou leite de cal, com base em calcário com elevado teor de cálcio ou de magnésio. Normalmente, a cal, com elevado teor de cálcio, tem menos de 5% de MgO. Quando a cal origina-se de um calcário com elevado teor de magnésio, o produto é conhecido por cal dolomítica.

No aspecto do mercado global da cal, predomina o uso da cal virgem cálcica, em face da sua aplicação nas áreas da siderurgia, indústria açucareira, celulose, carbureto de cálcio, tintas para caiações (PEREIRA e FERREIRA, 2009).

Outro mercado importante é o da cal hidratada, usada na construção civil como argamassa. O controle de qualidade da cal hidratada é feito de acordo com a Norma Brasileira NBR 717/503, na qual as principais exigências são: teor de anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>), óxidos totais (CaO + MgO), distribuição granulométrica, retenção de água, plasticidade e incorporação de areia (ABPC, 2013).

A cal produzida é classificada (GUIMARÃES, 1998) conforme o óxido predominante, em:

- cal virgem cálcica, com óxido de cálcio entre 90% e 100% do óxido total presente;
- cal virgem magnesiana, com teores de óxidos de cálcio entre 65% e 90% do óxido total presente;
- cal virgem dolomítica, com óxido de cálcio entre 58% e 65% do óxido total presente.

Outra denominação é a chamada cal aérea, quando se deseja ressaltar que a sua característica de ligante é devido à sua reação com o anidrido carbônico do ar (GUIMARÃES, 1998).

Existem várias outras denominações para a cal virgem, fazendo alusão à sua destinação, à sua cor, aos teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio, ao tipo de rocha carbonatada calcinada etc. Assim temos: cal virgem para acabamento, cal virgem para açúcar, cal virgem azulada ou cinza, cal virgem árida (resultante da calcinação de dolomitos), cal virgem de conchas (derivada de conchas marinhas), entre outras (GUIMARÃES, 1998).

Como já foi visto, a reação que produz a cal (CaO) consiste, essencialmente, da calcinação de rochas carbonatadas, com desprendimento de gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

As rochas carbonatadas são constituídas, predominantemente, por calcita (CaCO<sub>3</sub>), aragonita (CaCO<sub>3</sub>), dolomita (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>) e Magnesita (MgCO<sub>3</sub>), que se distribuem pelas categorias seguintes: calcário (relação entre as percentagens de CaCO<sub>3</sub> e de MgCO<sub>3</sub> é igual ou maior que 10), calcário magnesiano (relação entre as percentagens de CaCO<sub>3</sub> e de MgCO<sub>3</sub> tem valores entre 10 e 3,5), calcário dolomítico (relação entre as percentagens de CaCO<sub>3</sub> e de MgCO<sub>3</sub> tem valores entre 3,5 e 1,5) e dolomito (relação entre as percentagens de CaCO<sub>3</sub> e de MgCO<sub>3</sub> tem valores entre 1,5 e 1), entre outros (GUIMARÃES, 1998).

É de grande simplicidade a tecnologia de fabricação de cal. No entanto, exige que se observem determinadas condições mínimas, mesmo quando são utilizados fornos comuns.

A calcinação do calcário, para a produção do CaO, dá-se segundo a reação expressa na Equação [1]. O desprendimento de gás carbônico deve ser feito de forma correta, sendo uma das condições fundamentais para o bom êxito da reação, pois esta é reversível, dependendo da quantidade de CO<sub>2</sub> presente (CUNHA et al., 1949).

Essa reação se processa entre as temperaturas 850 e 900°C. O composto CaO é denominado, mais comumente, de cal virgem.

Libertar o gás carbônico e arrastá-lo rapidamente para fora do forno é uma das chaves de sucesso da fabricação.

Outro ponto a considerar é o fato que, durante o aquecimento, na alta temperatura em que se processa a decomposição, ter início um novo arranjo estrutural da rocha calcária. Essa modificação tende, com a elevação da temperatura ou com o prolongamento do aquecimento, a tornar mais densa a estrutura da rocha, eliminando os vazios da estrutura anterior.

A permanência desses vazios, que são verdadeiros canais de penetração da água, facilita a hidratação da cal virgem e, em consequência, o seu melhor aproveitamento. Deve ser evitado, assim, o superaquecimento que se traduz em sub-hidratação.

Se tomarmos um bloco de calcário e elevarmos a temperatura até a temperatura de calcinação, a cal virgem resultante terá a mesma forma do bloco de calcário, havendo apenas uma diminuição de peso de 44% e de volume de 12 a 20%. No caso da calcinação da dolomita, há uma redução, em massa, de 48% (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

Para se trabalhar com a cal, tem-se que fazer a sua extinção. Quando em contato com a água, a cal vai se hidratar e pulverizar. Isto se passa segundo a Equação [6].



O Ca(OH)<sub>2</sub> produzido é o que se chama de cal extinta ou cal hidratada. Essa reação se dá com um grande desprendimento de calor. Vai haver um grande aumento de volume devido à água. Normalmente, as misturas são feitas utilizando a cal extinta. A cal extinta ou hidratada se apresenta sob a forma de pó seco, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, classificada em:

- Tipo E, quando constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio;
- Tipo C, quando constituída, essencialmente, de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

Têm-se, ainda as denominações comerciais: cal hidratada para acabamento, para açúcar, para argamassas, agricultura etc., dependendo da sua destinação.

Quando em contato com o  $\text{CO}_2$ , dá-se a reação inversa, formando novamente o  $\text{CaCO}_3$  cristalizado, segundo a Equação [7]:



Esta reação contida na Equação [7] se denomina recarbonatação, também chamada de recarbonização por alguns autores. É uma operação muito lenta e se dá de fora para dentro da massa; podendo demorar até 10 dias. A água funciona como um catalisador dessa recarbonatação.

Apesar da reação reversível, responsável pela calcinação e recarbonização do calcário, ser por demais estudada, além de considerada simples e fundamental, na prática, a calcinação de calcário requer condições operacionais otimizadas para se chegar ao desempenho desejado. Para atingir esse desempenho é necessário considerar três fatores ligados ao processo, quais sejam (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008):

- o calcário deve ser aquecido até a temperatura de dissociação dos carbonatos;
- a temperatura mínima de dissociação (bem elevada na prática) deve ser mantida por um período, em geral, definido de acordo com as impurezas do calcário;
- a remoção do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) deve ser o mais rápido possível, pois o  $\text{CO}_2$  liberado percorre uma longa distância no ambiente de calcinação até ser totalmente removido.

#### *Classificação das Cales (CUNHA, 1949)*

**Quanto à composição:** como são normalmente muito ricas em magnésio, pode-se dizer que tem-se sempre uma mistura de  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ . Então tem-se na extinção  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ . Verifica-se que nas cales puras, a extinção é mais rápida. Assim, as cales podem ser classificadas em calcíticas (tem menos de 20% de  $\text{MgO}$ ) e magnesianas (tem mais de 20% de  $\text{MgO}$ ).

**Quanto ao rendimento:** as cales são classificadas em gordas, quando o seu rendimento é superior a  $1,82 \text{ m}^3$  de pasta, para 1 tonelada de cal; e magras quando têm um rendimento inferior a  $1,82 \text{ m}^3$  de pasta para 1 tonelada de cal.

**Quanto à forma (classificação do IPT):** quanto à forma podem ser classificadas em pedaços (tal com sai do forno); selecionadas (quando é separado o material cozido do super cozido), ou seja, separa o que serve do que não serve; e pulverizadas (que é a cal já extinta).

**Quanto à velocidade de extinção:** quanto à velocidade de extinção, as cales são classificadas como lenta (são as que gastam mais de 30 minutos para começar a extinção); média (as que gastam entre 5 e 30 minutos para começar a extinção); e rápida (gastam menos de 5 minutos para começar a extinção).

### Calcinação de Gipsita

O processo de calcinação da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), *in natura*, é caracterizada quando a gipsita é submetida a temperaturas que variam de 120 a 180°C. A gipsita perde parte da água de cristalização e se transforma em hemidrato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) ou gesso (PINHEIRO, 2011).

Dependendo do processo de calcinação da gipsita, obtêm-se as variedades de hemidrato conhecidas como gesso beta ( $\beta$ ), com uma ampla variedade de aplicações industriais. O gesso beta ( $\beta$ ) é utilizado, principalmente, no setor da construção civil, que representa mais de 95% do mercado de gesso. Entre suas principais aplicações, pode-se destacar na fabricação de elementos pré-moldados, como placas para forro, elementos decorativos (sancas, pedestais, objetos artísticos e etc.), blocos divisórios e placas de gesso acartonado utilizados tanto para forros como para divisórias e revestimentos de paredes e tetos (com um tempo de pega maior) e produção de gesso cola, utilizada no assentamento de blocos, de placas e na fixação de elementos decorativos e chapas de gesso acartonado. O gesso alfa ( $\alpha$ ), produto mais nobre, tem como principais aplicações fabricação de gesso para fins odontológicos e ortopédicos, fabricação de moldes para produção de peças cerâmicas e joias; e fabricação de argamassas de usos especiais, utilizadas na execução de contrapesos autonivelantes.

De forma geral, o processo de produção do gesso envolve as seguintes operações:

**1° Etapa** - na lavra da gipsita ocorre a exploração do minério e seleção prévia da matéria-prima (Figura 4), descartando o minério contaminado com argila denominado de boró e alabastro (gipsita fibrosa), Figura 5.

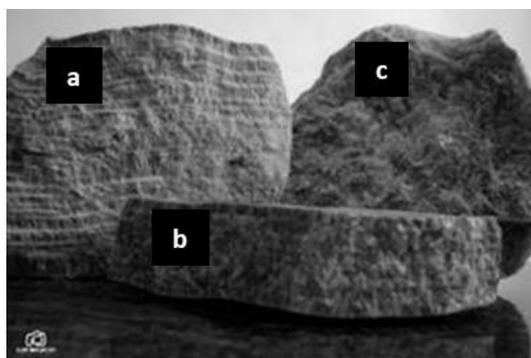


**Figura 4.** Lavra a céu aberto da Mineradora *Royal Gipsó Ltda* (Araripina, PE - 2016).



**Figura 5.** Gipsita fibrosa intercalada com argila cálcio magnesiana.

A seleção primária da gipsita é realizada de acordo com o tipo de gesso a ser produzido. Os tipos Cocadinha, Rapadura e Estrelinha (Figura 6) são utilizados para o processo de calcinação do gesso tipo Beta (gesso de fundição, gesso de revestimento e gessos aditivados: gesso projetado e gesso cola). Este processo de calcinação é realizado mediante a calcinação controlada da gipsita bruta em diversos tipos de fornos.



**Figura 6.** Variedades de gipsita: (a) Cocadinha, (b) Rapadura e (c) Estrelinha.

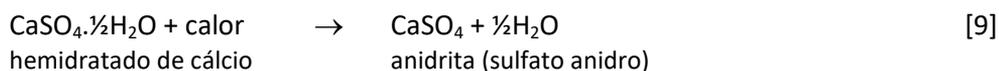
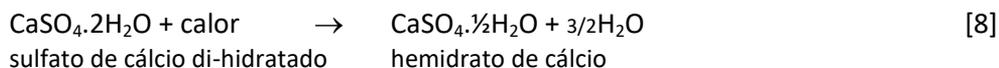
A variedade *Johnson* possui um maior valor agregado por possuir cristais bem definidos e alinhados e com maior resistência mecânica. Este tipo de gipsita é utilizada para se fazer gesso tipo *Alfa* (gesso ortodôntico e gesso ortopédico).

**2º Etapa** - o beneficiamento da gipsita passa pelo processo de britagem e moagem, onde são utilizados britadores de mandíbula e moinhos de martelo. Em alguns casos também é usado um segundo estágio, em circuito fechado com peneiras vibratórias a seco.

**3º Etapa** - a calcinação do minério ocorre a partir da desidratação parcial da gipsita moída a uma determinada faixa de temperatura, originando um sulfato de cálcio hemi-hidratado, conhecido, comercialmente, como gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ).

Esta característica de desidratar e reidratar de forma estável e com boa consistência mecânica classificam a gipsita como a principal matéria prima para fabricação do Gesso (produto calcinado).

A operação de calcinação da gipsita transformando-se em gesso ou anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) ocorre segundo as reações químicas listadas nas Equações [8] (transformação da gipsita em gesso com liberação de vapor) e [9] (transformação de gesso em anidrita), com liberação de vapor.



No processo de calcinação, as condições de desidratação podem ocorrer, sob pressão atmosférica e com pressões maiores que atmosféricas.

**Calcinação sob pressão atmosférica:** o aquecimento do forno pode ser direto, com o forno trabalhando de forma contínua (fornos rotativos tubulares) e indireto (fornos tubulares encamisados), com o forno operando de forma contínua ou por batelada. A calcinação sob pressão atmosférica, geralmente é realizada em fornos rotativos tubulares com diâmetros variando entre 1 a 3m e o comprimento variando na faixa de 12 a 20m (PERES e SANTOS, 2001). A gipsita moída é introduzida no forno após a câmara de combustão e transita pelo forno até a outra extremidade, determinando o tempo de residência do minério dentro do forno. Este tipo de calcinação é utilizado para produção de gesso *Beta*.

**Calcinação indireta e contínua:** a calcinação nestas condições é, normalmente realizada em fornos tubulares encamisados, onde os gases quentes transitam entre as duas estruturas metálicas do forno e a gipsita é calcinada na parte interna do forno.

**Calcinação indireta por batelada:** a calcinação nestas condições é, normalmente, realizada em fornos marmitas horizontais (rotativo) e verticais (estático). As dimensões destes fornos variam dependendo da capacidade produtiva de cada fábrica de gesso. Os fornos marmitas horizontais apresentam uma característica, que é o sistema de giro do forno. Este tipo de forno gira em um determinado sentido para calcinar e altera o sentido do giro para descarregar o gesso. No Brasil, os principais fabricantes são as metalúrgicas inseridas no Pólo Gesseiro do Araripe, PE.

**Calcinação sob pressão maior que a atmosférica, principais características:** o aquecimento do forno é direto com fluido térmico (água/vapor). Os fornos trabalham autoclavados (hermeticamente fechados) ou através de um reator (aquecimento direto com água), este tipo de calcinação é utilizada para produção do gesso *Alfa*.

Tipos de aquecimento da calcinação:

- o aquecimento direto ocorre quando os gases da combustão entram em contato com o minério;
- o aquecimento indireto ocorre quando o calor atinge a estrutura metálica do forno e esse transfere calor para o minério.

Regimes de operação da calcinação:

- regime contínuo ocorre quando o processo de calcinação funciona sem paradas;
- regime por bateladas ocorre quando o processo de calcinação é interrompido periodicamente.

*Variáveis do Processo*

A temperatura é o fator determinante na obtenção de produtos diferenciados a partir da calcinação da gipsita. À medida que a temperatura aumenta e também o tempo de calcinação, o gesso passa a ter um tempo de endurecimento mais lento com maior resistência mecânica (YAZIGI, 2002). A Tabela 1 descreve as características do gesso em função da variação de temperatura.

**Tabela 1.** Influência da temperatura na obtenção do gesso.

Faixa de Temperatura de Aquecimento	Processo	Tipo de Produto
110 a 150°C	Transformação da gipsita em gesso.	Gesso de fundição (gesso <i>Beta</i> rápido)
170 a 250°C	Transformação do gesso em anidrita (instável e ávida por água)	Anidrita solúvel, carga, para aditivação do gesso rápido para aumentar o tempo de pega do gesso.
300 a 600°C	Anidrita totalmente desidratada e com tempo de pega longo.	Anidrita insolúvel, carga mistura, aumentar a produção do gesso lento.
600 a 900°C	Produto inerte	

Fonte: PERES e SANTOS, 2001

O processo de calcinação varia de acordo com o tipo de forno utilizado. A calcinação sob pressão atmosférica e com a variação da temperatura e do tempo de residência permite obter gesso *Beta* com diferentes características diretamente relacionadas à sua utilização, como pode ser observado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Obtenção dos tipos de gesso em função da variação da temperatura de calcinação.

Tipo de Gesso <i>Beta</i>	Tempo de Residência	Tempo de Pega Inicial	Tempo de Pega Final
Gesso rápido ou de fundição	1 hora e 10 minutos	4 a 10 minutos	20 a 45 minutos
Gesso lento ou de Revestimento	1 hora e 20 minutos	>10 minutos	>45 minutos

Fonte: ABNT-NBR 13207, 1994

Além desses tipos, existe ainda o gesso cerâmico, que é uma variedade mais nobre do gesso de fundição.

A moagem após a calcinação, geralmente em moinhos de martelos, é de fundamental importância para adequação da granulometria final, aumentando a superfície específica e potencializando as características do gesso, conforme as normas brasileiras da ABNT.

A depender das condições de calcinação, o gesso pode passar por um período de ensilamento ou estabilização, com o objetivo de obter uma maior homogeneidade na composição final (PERES e SANTOS, 2001).

O ensacamento, normalmente o gesso é acondicionado em sacos multifoliados de papel de 40 e 20 kg. Em alguns casos, pode-se optar por ensacar em *big bags* retornáveis de com capacidade de 1 tonelada, diminuindo o custo final do produto.

#### *Insumos Energéticos Utilizados na Calcinação de Gipsita*

No processo da calcinação da gipsita, no polo gesseiro da mesorregião do Araripe, a lenha destaca-se como principal energético. Observa-se que 90% da matriz energética é composta por lenha. Grande parte da mesma é de baixo poder calorífico.

**Lenhas Nativas:** as lenhas nativas são as chamadas plantas xerófilas, que o agrônomo Jacob Souto, professor da Universidade Federal de Campina Grande, em Patos, no sertão da Paraíba, denominou: lenhas frutíferas e lenhas exóticas.

**Lenhas Frutíferas:** a lenha permitida para a venda é originária de qualquer árvore frutífera (caju, manga, goiaba, uva, etc.).

**Lenhas exóticas:** as principais espécies destinadas à utilização como lenha são o eucalipto e a acácia negra, além da uva japonesa e, em alguns casos, o pinos. O cultivo é em grande parte de eucalipto e algaroba, porém, a maior produção é destinada para as serrarias e fabricação de carvão vegetal.

**Óleo combustível BPF:** o processo de refino de petróleo passa por duas etapas, destilação atmosférica e destilação a vácuo; nesta última etapa é obtido o óleo combustível. No final do processo de destilação, a refinaria poderá optar em produzir óleo combustível BPF (baixo ponto de fulgor) que geralmente é utilizado em fornos, caldeiras, etc. ou através de um processo de craqueamento retardado produzir o coque de petróleo verde (CVP), que pode ser de baixo, médio ou alto teor de enxofre.

#### *Tipos de Fornos Utilizados para Calcinação da Gipsita*

No Brasil, especificamente no Pólo Gesseiro do Araripe, situado no extremo oeste de Pernambuco que é responsável por 84,3% da produção de gipsita no Brasil (GALO e GAMA JÚNIOR, 2015), com 25 mineradoras em atividade, 126 calcinadoras, que produziram em 2015 aproximadamente 3 milhões de toneladas de gesso (SINDUSGESSO, 2015).

Atualmente, os tipos de fornos mais utilizados, de acordo com as planta de calcinação são o tipo panela, marmita vertical e rotativo.

**Forno tipo panela:** é um forno fabricado no Pólo Gesseiro do Araripe-PE, produzido nas metalúrgicas locais, que utiliza chapas de aço para sua estrutura circular de grande diâmetro e pequena altura. Este forno possui baixa capacidade produtiva, utiliza lenha como combustível para desidratação da gipsita. As principais características do forno tipo panela se encontram na Tabela 3.

**Tabela 3.** Características do forno panela para produção de gesso.

<b>Principais Características</b>	
Tipo de regime de operação	Intermitente
Tipo de queima	Indireta
Tipo de gesso produzido	Gesso Beta
Capacidade de produção	Baixo
Uniformidade do tempo de pega do gesso	Ruim
Custo de manutenção	Baixo
Controle de temperatura com instrumentos	Inexistente
Poder calorífico (kcal/kg)	3.131
Eficiência térmica (%)	14
Consumo de lenha (kg/t)	350

**Forno tipo marmita vertical:** é um forno fabricado no Brasil a partir da década de 90. Este tipo de forno tem a flexibilidade de operar com lenha ou com óleo BPF, combustível derivado do petróleo. O forno utiliza chapas de aço para sua estrutura circular externa e no interior do forno existe um revestimento composto de tijolos refratários. A fornalha encontra-se na parte inferior do forno.

O forno marmita vertical quando comparado ao forno panela tem maior capacidade produtiva, com aproximadamente 700 kg/h. As principais características do forno tipo marmita vertical se encontram na Tabela 4.

**Tabela 4.** Características do forno marmita vertical para produção de gesso.

Principais Características	
Tipo de regime de operação	Intermitente
Tipo de queima	Indireta
Tipo de gesso produzido	Gesso Beta
Custo de manutenção	Intermediário
Controle de temperatura com instrumentos	Aplicável
Poder calorífico com lenha (kcal/kg)	3.131,20
Poder calorífico com Óleo BPF (kcal/kg)	9.770
Eficiência térmica (%)	14
Consumo de lenha (kg/t)	350
Consumo de Óleo (kg/t)	45

**Forno tipo rotativo:** é um forno rotativo tubular, que pode operar com a queima direta e a queima indireta da gipsita de forma contínua. No Brasil, as maiores partes dos fornos rotativos operam com a queima indireta do minério e são fabricados para trabalhar com óleo BPF para produzir o gesso.

O forno rotativo por ser um forno contínuo, promove a obtenção de um produto com características uniformes. Podemos citar, como exemplo, o tempo de pega do gesso. O rendimento térmico do forno é maior, devido ao tipo de aquecimento. A fornalha é operada de forma independente permitindo a manutenção rápida e com poucas paradas. É um forno utilizado mundialmente, principalmente na Espanha. Os incentivos mercadológicos e o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado, permite que a Europa utilize uma matriz energética, tal como, o gás liquefeito de petróleo (gás GLP), que é mais dispendioso, porém apresenta uma maior eficiência energética e os fornos rotativos contínuos podem ser utilizados através de queima direta. As principais características do forno tipo rotativo se encontram na Tabela 5.

**Tabela 5.** Características do forno rotativo para produção de gesso.

Principais Características	
Tipo de regime de operação	Contínuo
Tipo de queima	Direta/indireta
Tipo de gesso produzido	Gesso Beta
Custo de manutenção do forno	Intermediário
Controle de temperatura com instrumentos	Aplicável
Poder calorífico com Óleo BPF (kcal/kg)	9.495
Eficiência térmica (%)	45
Consumo de Óleo BPF (kg/t)	35

Para uma melhor aplicação e entendimento sob o uso dos fornos, a Tabela 6, mostra as principais características dos equipamentos utilizados na calcinação da gipsita.

**Tabela 6.** Tabela comparativa dos fornos de gesso em operação no Brasil.

Tipo de Gesso de Forno	Forno Rotativo	Forno Marmita	Forno Painela
Tipo de gesso produzido	Gesso Beta (fundição)	Gesso Beta (fundição e revestimento)	Gesso Beta (fundição e revestimento)
Controle do tempo de pega	Não	Sim	Sim
Poluente do ambiente interno	Pouco	Pouco	Muito
Matriz energética	BPF	Lenha ou BPF	Lenha
Consumo da matriz energética (1000 Kcal/t gesso)	332	1.096 - 440	1.643
Investimento	Grande	Médio	Pequeno
Capacidade produtiva (t/h)	2,5 – 3,5	0,6 - 0,8	0,1 – 0,2

### Calcinação de Caulim para Produção de Metacaulinita

O termo caulim é utilizado tanto para denominar a rocha que contém o mineral caulinita, quanto ao produto resultante do beneficiamento da mesma. A caulinita, seu principal constituinte, é um silicato de alumínio hidratado que apresenta a seguinte fórmula química:  $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ .

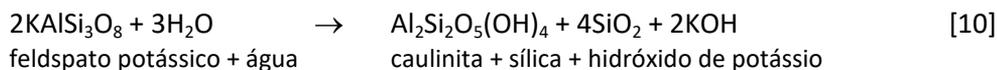
Os caulins são resultantes da alteração de silicatos de alumínio, particularmente da alteração dos feldspatos.

A calcinação do caulim se dá por meio do tratamento térmico do caulim. É possível a obtenção de dois produtos: o caulim parcialmente calcinado e o caulim de calcinação completa.

O caulim parcialmente calcinado é obtido após um tratamento térmico entre 650 e 700°C, procurando remover, apenas, os grupos estruturais de hidroxila. O caulim de calcinação completa é obtido quando o tratamento térmico ocorre entre as temperaturas de 1000 e 1050°C. Nesta temperatura, a caulinita muda de fase, passando para uma mistura de mulita, cristobalita e sílica-alumina.

Segundo Shvarman et al. (2003), citado por Oliveira e Barbosa (2006), o aproveitamento de caulim calcinado, como pozolana para argamassa e concreto, tem se tornado uma prática nos últimos anos.

Segundo Grim (1958) citado por Luz et al. (2008), caulim é uma rocha de granulometria fina, constituída principalmente de material argiloso – caulinita, com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca. Os caulins podem ser classificados como primários e secundários. Os caulins primários, tipo intemperizados, são característicos de clima tropical (quente e úmido) nos quais as condições físico-químicas são adequadas para alteração dos feldspatos, bem como de outros alumino-silicatos presentes em granitos ou rochas metamórficas. Tem-se então um processo de caulinização da rocha, onde ocorre a hidratação do silicato anidro de alumínio, seguida da remoção de álcalis, de acordo com a Equação [10] (LUZ et al., 2008).



### *Concreto de Alto Desempenho*

O concreto de alto desempenho (CAD) surgiu no início da década de 1960 e, devido às suas características de alta resistência e durabilidade, está gradualmente substituindo o concreto de resistência normal, principalmente, em estruturas expostas a ambientes agressivos.

Um dos fatores que contribui para a alta resistência e a durabilidade do CAD são o uso de aditivos minerais como materiais cimentícios suplementares, como por exemplo, a metacaulinita. As partículas ultrafinas de metacaulinita atuam de forma a preencher os espaços vazios existentes entre as de maior tamanho, gerando um aumento na densidade de empacotamento do concreto, reduzindo a quantidade de água necessária para o processamento e proporcionando uma melhor fluidez do concreto.

Nos anos de 1960 e 1970, concretos com resistência à compressão de 50 a 70 MPa já eram considerados nos Estados Unidos, como concretos de alta resistência e usados comercialmente. Atualmente, concretos com 90, 100 e 120 MPa são usados na construção de edifícios altos, plataforma de petróleo e pontes (CORDEIRO, 2001).

Estudos realizados com rejeitos de caulim de unidades industriais de beneficiamento de caulim para papel, no estado do Pará, como matéria prima para produção de uma metacaulinita altamente reativa, mostraram que o concreto com essa metacaulinita apresentou resistência à compressão superior aos de concretos de referência e similares ao de sílica reativa (BARATA e MOLIN, 2002).

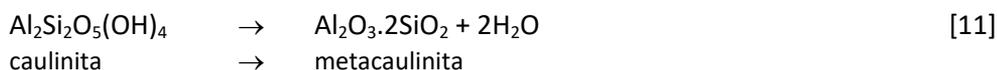
O uso de metacaulinita – caulim calcinado – como material pozolânico para argamassa e concreto, tem sido estudado nos últimos anos. A substituição parcial do cimento Portland por metacaulinita na argamassa resultou num aumento da resistência a compressão simples em ralação aos níveis de referência (OLIVEIRA et al., 2004).

A metacaulinita não apresenta propriedades aglomerantes e hidráulicas; entretanto, seus constituintes podem reagir, em presença de água e temperaturas ordinárias, com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , resultando em novos compostos hidratados com propriedades cimentícias e insolúveis em água.

O uso da metacaulinita, obtida pela calcinação de uma argila caulinitica extraída na planície aluvial do Rio Paraíba do Sul-Campos/RJ, em substituição parcial do cimento Portland, aumentou a resistência à compressão do concreto e de argamassa (CORDEIRO, 2001).

#### *Obtenção de Metacaulinita*

A metacaulinita é obtida a partir da calcinação do caulim entre 560 e 980°C, ocorrendo a perda do grupo-OH de sua estrutura cristalina, formando um produto amorfo. A metacaulinita é um produto amorfo resultante do processo de desidratação da caulinita, mediante a calcinação em temperaturas controladas, segundo a reação [11].



A caulinita ao ser calcinada se torna mais reativa ao perder a hidroxila, provocando um colapso e desarranjo da sua estrutura cristalina. As propriedades pozolânicas são resultantes do processo de calcinação a cerca de 500°C, cujas temperaturas ótimas estão entre 700 e 900°C (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006).

Entende-se por pozolana, substâncias naturais ou artificiais, de composição silicosa ou sílico-aluminosa, que embora por si só não sejam cimentícias, reagem com  $\text{Ca(OH)}_2$  à temperatura ambiente resultando em compostos de propriedades cimentícias.

As argilas contendo cinzas vulcânicas encontradas em Pozuolli, Itália, deram origem ao que se denomina hoje de pozolanas, pois ao reagirem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formam compostos com propriedades cimentícias.

O processo industrial de produção de metacaulinita praticado pelas empresas, principalmente as produtoras de cimento, usam os mesmos tipos de fornos rotativos utilizados para a obtenção do clínquer (CORDEIRO, 2001). É recomendável que o caulim, quer seja de origem primária ou secundária, usado para produção de metacaulinita seja submetido, inicialmente, a uma etapa de desareamento visando à remoção do quartzo, tendo em vista que este mineral reduz a reatividade pozolânica (NETTO, 2006).

Na Tabela 7, estão apresentadas as propriedades de uma metacaulinita brasileira, uma americana e uma microssílica existente no Brasil, com propriedades pozolânicas de alta reatividade destinada à produção de concreto de alto desempenho, bem como requisitos da norma ASTM 618. Quanto às propriedades pozolânicas, a norma brasileira NBR 12653 estabelece que o índice de atividade pozolânica (IAP) deve ser superior a 75%.

**Tabela 7.** Comparação de uma metacaulinita brasileira com uma americana, já em comercialização, e também com uma microssílica ativa, em comercialização no Brasil, e os requisitos da norma ASTM 618.

Propriedades	Brasileira	Americana	Microssílica	ASTM 618
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 93%	> 95%	> 96%	> 70%
$\text{SiO}_2$	50,4%	52,0%	96,0%	-
Tamanho médio	1,6 $\mu\text{m}$	1,5 $\mu\text{m}$	0,16 $\mu\text{m}$	-
Partículas > 45 $\mu\text{m}$	0,5%	-	-	< 34%
Área Superficial Específica	14,2 $\text{m}^2/\text{kg}$	16,5 $\text{m}^2/\text{kg}$	16,2 $\text{m}^2/\text{kg}$	-
Densidade aparente	2,57 $\text{kg}/\text{dm}^3$	-	2,22 $\text{kg}/\text{dm}^3$	-

## Calcinação de Alumina Hidratada

A alumina hidratada é obtida por:

- britagem da bauxita;
- desagregação, lavagem e classificação, para obtenção da bauxita lavada;
- digestão da gibsita (processo Bayer) contida na bauxita lavada;
- clarificação (separação sólido/líquido) e obtenção do licor rico em gibsita dissolvida;
- precipitação (cristalização da gibsita dissolvida na digestão);
- filtragem; e
- calcinação.

A calcinação da alumina hidratada consiste na eliminação da água de cristalização do hidróxido de alumínio (gibsita) transformando este em alumina (trióxido de alumínio) e água, de acordo com a reação expressa na Equação [3].



Segundo Andreu (2007), vários são os tipos de alumina obtidos na calcinação, dependendo da temperatura do processo. Dentre esses ressaltam-se a alumina grau metalúrgico – SGA, usada na fabricação de alumínio metálico, e a alumina grau químico não metalúrgico.

A alumina obtida na calcinação deve atender às especificações de distribuição granulométrica, área superficial, perda ao fogo (ppc) e conteúdo de alumina pretendida (Tabela 7). O teor de sódio na alumina grau metalúrgico deve ser baixo. Atentar também que a energia empregada deve estar próxima da requerida para a decomposição do hidrato de alumínio (EBAH, 2017).

De acordo com Andreu (2007) os principais tipos da alumina produzidas são:

- alumina grau metalúrgico-SGA, para fabricação de alumínio metálico;
- alumina grau químico não metalúrgico para cerâmica (fritas, esmalte, engobe); polimento; creme dental; vidro (como estabilizador); coagulantes (sulfato de alumínio); espuma de poliuretano; polímeros (retardador de chama).

A maior parte (90%) da alumina tri-hidratada [ $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ] produzida pelo processo Bayer é usada na produção de alumínio metálico, pelo processo eletrolítico Hall-Héroult (produção de 0,5 t de alumínio metálico para cada tonelada de alumina). Os outros 10% são usados nos segmentos da indústria de materiais refratários, abrasivos, válvulas de ignição, cerâmica, dentre outros (CONSTANTINO et al., 2002).

## BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

---

ABPC-2013 (Associação Brasileira de Produtores de Cal). Programa Setorial da Qualidade da Cal Hidratada para Construção Civil - Relatório Setorial para Divulgação n. 067ª, março -2013.

ABNT-NBR 13207 – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13207. Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994.

ANDREU, J.C. (2007). Minerais Industriais-Aluminas, Alcoa Latin America, 12<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte, Set. 2007. Acesso internet em março-2017.

BARATA, M.S.; MOLIN, D.C.C (2002). Avaliação preliminar do resíduo das indústrias do beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, p. 69-78, jan/mar. 2002.

BOGUE e GILKEY. Cement ECT, v. 4, 1964.

BOGUE R.H. The Chemistry of Portland Cement. 2<sup>a</sup> ed. Cap. 1. 1955.

CARPIO, R.C.; RUFINO JUNIOR, C.A.; LEMOS, L.S.; SOUSA, V.S.; DANTAS, V.A. (2013). Estado da Arte do Processo Produtivo da Cal na Região Centro Oeste de Minas Gerais, ForSci: r. cient. IFMG Campus Formiga, v. 1, p.49-60, jul/dez. 2013.

CONSTANTINO, V.R.L.; ARAKI, K; SILVA, D.O; OLIVEIRA, W. (2002). Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático, Quim. Nova, v. 25, n. 3, 490-498, 2002.

CORDEIRO, G.C. (2001). Concreto de alto desempenho com metacaulinita. Dissertação de mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Fluminense-UENF, 2001.

CUNHA, J. Indústria Brasileira de cal. DNPM – Laboratório da Produção Mineral (LPM). 1949.

CUNHA, J; GUIMARÃES, J.E.P.; FERREIRA, B.A.; ROQUETE, B. Análises de calcário e indústria de cal no Brasil. In: Boletim 33, do Laboratório da Produção Mineral – LPM/DNPM. 1949.

EBAH – Rede Acadêmica para o Compartilhamento Acadêmico ([www.ebah.com.br/Search.?q](http://www.ebah.com.br/Search.?q)). Acesso a internet em março de 2017.

GALO, J.B. e GAMA JÚNIOR, N.A. CAL, Sumário Mineral, v.35, p. 36-37. DNPM/MME. Brasília, 2015.

GUIMARÃES, J.E.P. A indústria de cal no Brasil. ABPC – Associação Brasileira dos Produtores de Cal. São Paulo, 1990.

GUIMARÃES, J.E.P. Terminologia de calcários – dolomitos, In: Associação Brasileira de Cal. ABPC – Associação Brasileira dos Produtores de Cal. São Paulo, 1958.

GUIMARÃES, J.E.P. A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1ª Edição, São Paulo, 1998.

HECK, N.C. Calcinação. ENG06632-Metalurgia Extrativa dos Metais Não Ferrosos II-A – DEMET UFRGS. [www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Calcinacao.pdf](http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Calcinacao.pdf). Acesso em fevereiro 2017.

JOHN, V.M.; PUNHAGUI, K.R.G.; CINCOTO, M.A. (2014). Produção de Cal-Núcleo de Estudos de Economia de Baixo Carbono, [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep\\_fep/chamada\\_publica\\_baixo\\_carbono\\_cal.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_baixo_carbono_cal.pdf). Acesso em fevereiro 2017.

LUZ, A.B.; CAMPOS, A.R.; CARVALHO, E.A.; BERTOLINO, L.C.; SCORZELLI, R B. (2008). Argila-Caulim. In: Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, Adão B. Luz e Fernando Lins (Edit.), p. 256-294, CETEM/MCT, 2008.

MEDEIROS, P.T. (2017). Processos de Fabricação e Controle de Qualidade da Cal e Cimento. <https://petrucciotm.files.wordpress.com/2011/02/cal-e-cimento-fabricac3a7c3a3o-2008.pdf>. Acesso em fevereiro 2017.

NETTO, R.M. (2006). Materiais Pozolânicos. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.

OLIVEIRA, M.P. e BARBOSA, N.P. (2006). Potencialidade de um caulim calcinado como material de substituição parcial de cimento Portland em argamassas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, Campina Grande-PB, Abril/junho 2006, p. 1-7.

OLIVEIRA, M.P.; NÓBREGA, A.F. DI CAMPOS, M.S. (2004). Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. Anais. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais – Habitações e Infra Estrutura de Interesse Social – Brasil NOCMAT, Pirassununga, 29 de out. a 03 nov. 2004.

PAIVA, S.C.; GOMES, E.A.O.; OLIVEIRA, R.A. Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas. UNICAP, Pernambuco, 2007.

PEREIRA, L.S.; FERREIRA, G.E. (2009). A indústria da cal no Brasil, XVII Jornada de Iniciação Científica-CETEM, 2009.

PERES, L.; SANTOS, M.B.V.A (2001). O gesso: produção e utilização na construção civil – Luciano Peres, Mohand Benaouchor Valdemir A. dos Santos – Editora Bagaço, 2001.

PINHEIRO, S. Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2011.

ROSENQVIST, T. Principles of Extractive Metallurgy. 2ª ed. Mc Graw-Hill, 1983.

SAMPAIO, J.A. e ALMEIDA, S.L.M. Calcário e Dolomito. In: Rochas e Minerais Industriais, Usos e Especificações, ed: LUZ, A.B. e LINS, F.A.F., 2ª edição, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p. 363-387, 2008.

SINDUSGESSO, 2015. Disponível em <https://www.sindusgesso.org.br/>. Acesso em 01 de fevereiro 2017.

SOARES, B.D. Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica; Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Engenharia Química-Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2007.

TRAJANO, R.B. "Curso de Metalurgia Extrativa Geral". PUC/RJ, 1969.

YAZIGI, Walid. A técnica de edificar, 4ª ed. São Paulo: PINI, 2002, 669p.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

---

ABNT-NBR 6453 – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6453:2003. Cal virgem para a construção civil-requisitos, ABNT, 2003a

ABNT-NBR 7175 – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7175:2003. Cal hidratada para argamassa, ABNT, 2003b

CARVALHO, E.A.; ALMEIDA, S.L.M. Caulim e carbonato de cálcio: competição na indústria de papel. CETEM/CNPq/MCT. 1997.

CASTRO, M.S de. Diagnóstico energético do setor industrial do Pólo Gesseiro da meso região de Araripina-PE. Relatório Final. ATECEL, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO DE MINÉRIO – DNPM: Gipsita. Sumário Mineral, 2013.

PACHECO, F.; MATIAS, R. Melhoramento da qualidade do gesso para cimento Portland com resíduos cálcicos de reação. VIII CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, Revista eletrônica de Ciências da Terra, v. 20, n. 23, 2010. Disponível em: <http://metododirecto.pt/CNG2010/index.php/vol/article/view/68/456>. Acesso em 18 de julho 2013.

SANTOS, P.S. Ciência e Tecnologia das Argilas, 2ª Edição, Revisada e Ampliada, São Paulo: Edgar Blucher, 1992.

SYNDICAT NATIONAL D'ES INDUSTRIES DU PLÂTRE. Le plâtre - physico-chimie et fabrication. Paris, France, 1982. Disponível em [www.gessotopline.com.br/historia.htm](http://www.gessotopline.com.br/historia.htm). Acesso em 01 de janeiro 2017.

VIEIRA, A.L. Propriedades dos micro concretos fabricados com agregados contaminados por resíduos de gesso. Dissertação de mestrado do Programa de Pós graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

VILLANUEVA, L; Santos, A.G. *Manual del Yeso* – Luis de Villanueva y Alfonso Garcia Santos, *Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas* - UPM - Editora CIE, 2001.